

# The Helicoidal Fault Systems of Vinodol (Croatia) and Their Genesis

Ivan BLAŠKOVIĆ

**Key words:** Helicoidal fault system, Genesis of faults, En échelon folds, Faults impact on hydrogeology, Vinodol, Croatia.

**Ključne riječi:** sustav helikoidalnih rasjeda, geneza rasjeda, ešalonirane bore, hidrogeološka uloga rasjeda, Vinodol, Hrvatska.

## Abstract

The basic geological features of the helicoidal fault systems of the Vinodol area are outlined. Its genesis is explained by a model proposing collisional stress implied on previously formed en échelon folds. The importance of the fault system for structural and palaeogeographic reconstruction as well as its impact on hydrogeology are discussed. The model could be applied to the External Dinarides or to other similar systems.

## Sažetak

Na primjeru iz Vinodola dat je prikaz karakteristika sustava helikoidalnih rasjeda. Modelom je prezentirana geneza sustava, vezana uz djelovanje horizontalnog stresa na prvotno formirane ešalonirane bore. Istaknuto je značenje rasjednog sustava u strukturnoj i paleogeografskoj rekonstrukciji, kao i u hidrogeološkim istraživanjima. Prezentirani model može se primjeniti u Vanjskim Dinaridima a i šire.

## 1. INTRODUCTION

By analyzing the geological and especially structural relationships of the Vinodol area SE of Rijeka (mostly encountered along the north-eastern rim of the valley) fault systems of variable morphologic and kinematic features that change along their strike and dip are recognized.

Most of the northeastern rim of the Vinodol valley is composed of Upper Cretaceous rudist limestones, transgressively and discordantly overlain by Palaeocene-Eocene foraminiferal limestones. The valley itself is built up by the Eocene flysch sediments (GRIMANI et al., 1973). The rim-valley transition, i.e. the limestone-flysch contact is marked by two or more fault traces that by their kinematic function along the strike merge into reverse or even overthrust structures. The same faults associated with inclined, overturned and isoclinal synclines of SW vergence can explain the local, deep underthrusting of the flysch sediments (Fig. 1).

Within the described structural setting the complete fold structures are only partly preserved: synclines, as the footwall of the reverse faults, with flysch occupying their cores have subsided and thus became less exposed at the surface, while the limestone anticlines, as the hanging wall, are uplifted and have become more extended.

The fault traces are easily recognisable along their strike as the line of the carbonate-flysch contact. In cas-

es when the faults strike farther into the carbonates their presence is much less obvious. However, they can also be identified by the truncation and offset of a transgressive contact between the rudist and foraminiferal limestones or by some geomorphological indicators, the most frequently by linear arrangement of sinkholes in the carbonate terrain.

## 2. THE HELICOIDAL FAULT SYSTEMS OF VINODOL

Generally, the faults can be defined as convergent splay that joint the main fault (Fig. 2). In their marginal part splay strike NNW-SSE, more or less separated, predominately with oblique strike-slip and possibly normal movement.

The peculiarity of the faults of the system is the helicoidal shape of each individual fault plane (HARDING, 1983; NAYLOR et al., 1986; SYLVESTER, 1988). Along the strike, the azimuth of dip changes as the angle of dip gradually changes. An example of the fault systems used to create the model is shown in Fig. 3.

Close to the connection point the fault planes become more inclined and become vertical while along strike the dip changes in the opposite direction. Consequently, the normal sense of movement becomes reverse combined with an oblique slip component. The strike gradually becomes "more dinaric" in orientation, typically NW-SE. Thus, the main fault plane shows a relatively low angle of dip (up to 25°) with a marked reverse character and could possibly pass into an overthrust structure. The vergence of reverse and thrust faults corresponds with the SW vergence of the folds.

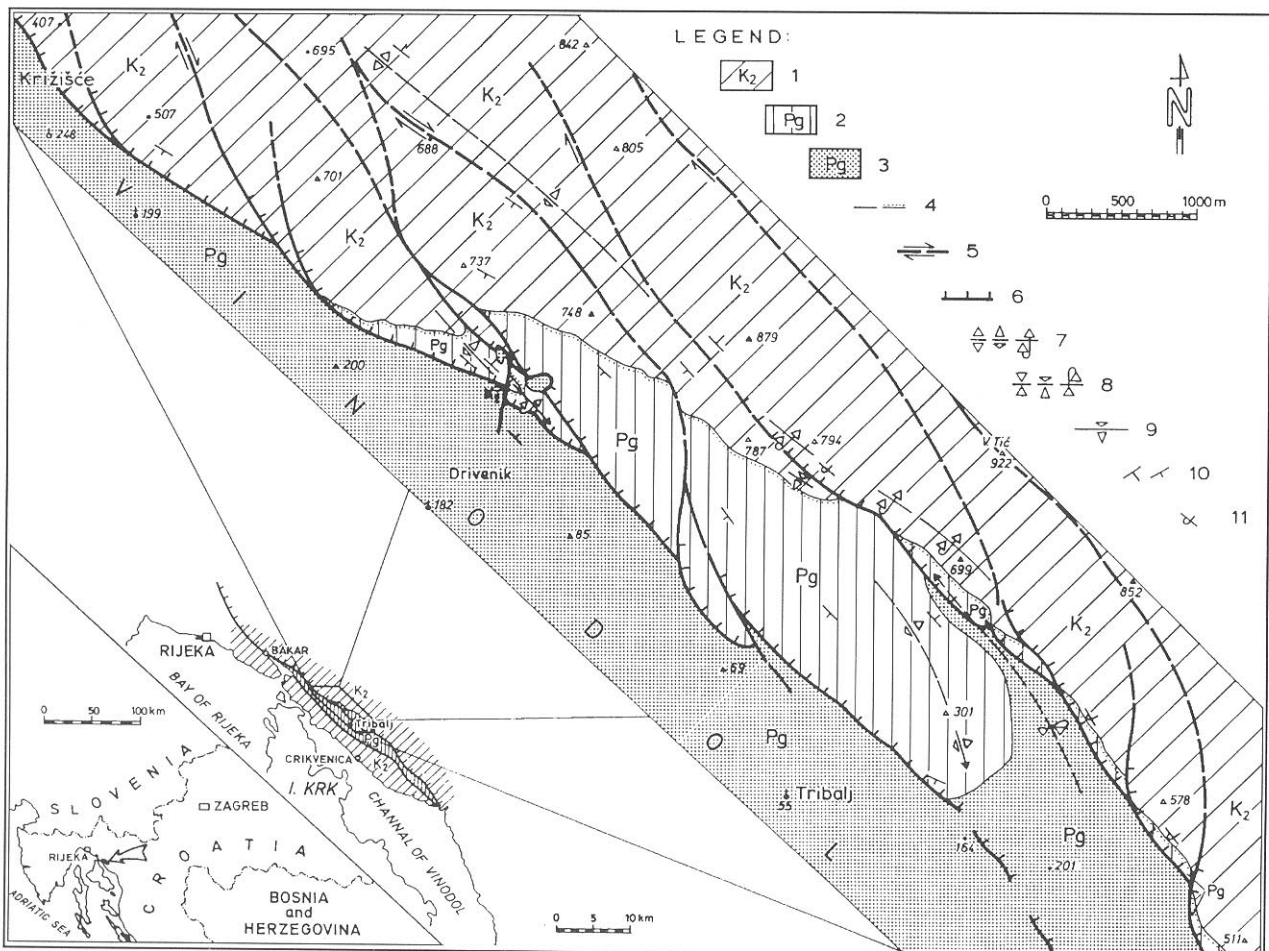
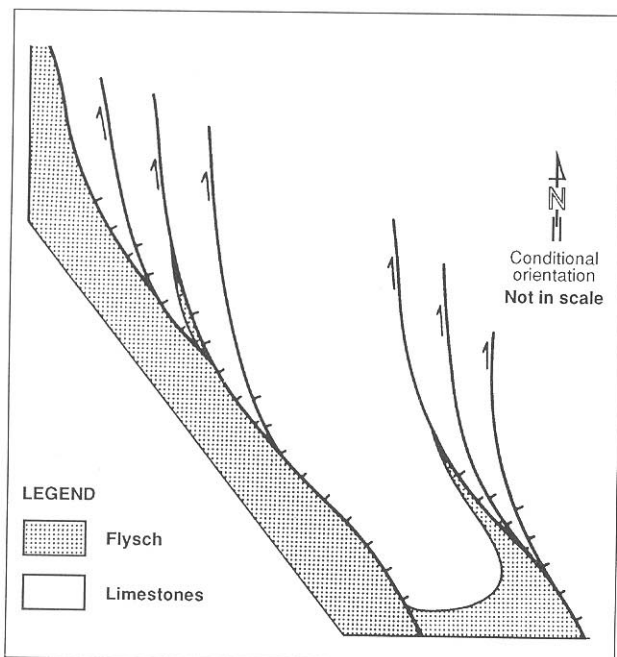


Fig. 1 Index and generalized geological map of the Vinodol area (after ŠUŠNJAR et al., 1970; simplified and partly modified). Legend: 1) Upper Cretaceous limestones and dolomites; 2) Palaeogene foraminiferal limestones; 3) Palaeogene flysch; 4) normal contact, unconformity; 5) strike-slip fault; 6) reverse fault; 7) upright, inclined, overturned anticline; 8) upright, inclined, overturned syncline; 9) monocline; 10) strike and dip of bedding with 25-35° and 50-75° angle of dip; 11) overturned bed.

Sl. 1 Smještajna i shematska geološka karta Vinodola. Shematski prikaz geoloških odnosa na dijelu sjeveroistočnog oboda Vinodola s posebno istaknutim uzdužnim rasjedima (prema ŠUŠNJAR et al., 1970, pojednostavljeno i dijelom dopunjeno). Legenda: 1) gornjokredni vapnenci i dolomiti; 2) paleogenski foraminiferski vapnenci; 3) paleogenski flišni sedimenti; 4) normalna granica, tektonsko-erozijska diskordancija; 5) horizontalni rasjed; 6) reverzni rasjed; 7) uspravna, kosa, prebačena antiklinala; 8) uspravna, kosa, prebačena sinklinala; 9) koljeničasta bora, fleksura; 10) položaj slojeva; veličina nagiba 25-35°, 50-75°; 11) prebačeni sloj.



The genesis of the described fault system lies in quite complex tectonics and great differences in the geomechanical properties of the carbonate and clastic sedimentary bodies. It could be explained by a succession of geodynamic processes and presented by a conceptual model as follows.

The geodynamic evolution begins with the Laramian deformation phase that resulted in the formation of en échelon folds (Fig. 4) and the consequent morphology. Furthermore, during the pre-Pyrenean and Pyrenean deformation phases the anticlinorian parts of the structures consisted of predominately of carbonate rocks and the synclinorian parts of flysch clastics. The thickness of clastics is directly related to the synform, as one part

Fig. 2 Schematic diagram showing two systems of convergent helicoidal faults in the NE rim area of Vinodol.

Sl. 2 Shematski prikaz dva sustava konvergirajućih helikoidalnih rasjeda u istraživanom dijelu sjeveroistočnog oboda Vinodola.

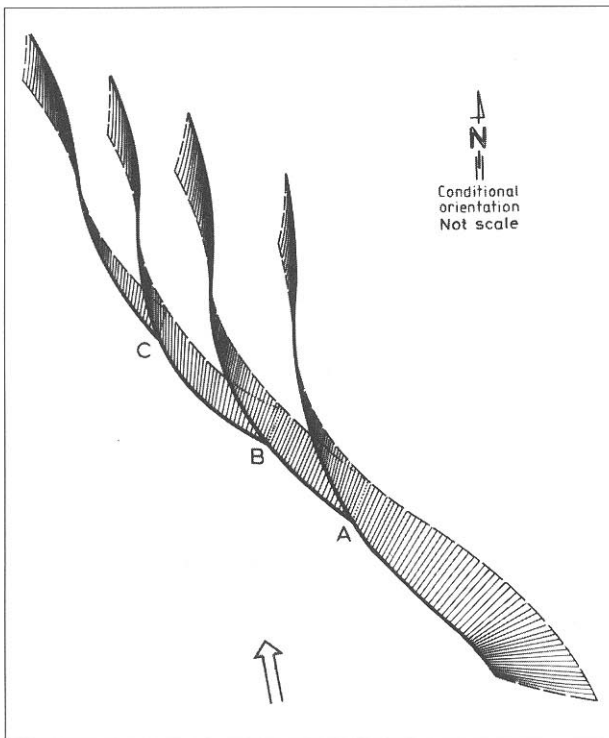


Fig. 3 Schematic plan view of convergent helicoidal fault planes with the greatest principal stress orientation. A, B, C as reference observation points for the second deformation phase (see Fig. 6).

Sl. 3 Shematski ortogonalni prikaz konvergirajućih helicoidalnih rasjednih ploha s naznačenom orijentacijom glavne osi stresa. A, B, C, referentne točke razmatranja u drugoj fazi strukturnih promjena (sl. 6).

of megastructure characterized by greater mobility and subsidence rate.

Even with more intensive folding during the progressive deformation process the mobility of the synforms and particularly the flysch thickness are of crucial importance, i.e. the amplitudes of folds are directly related to the thickness of the less competent, clastic sediments.

Under the same stress field regime that regionally resulted in the continental subduction of the Adriatic under the Dinaric (HERAK, 1980; BLAŠKOVIĆ & ALJINOVIĆ, 1981; BLAŠKOVIĆ, 1991), the structural changes are partially governed by the clockwise rotation of each individual fold around the "b" axis (Fig. 5a): the anticlines, as the more rigid, competent parts

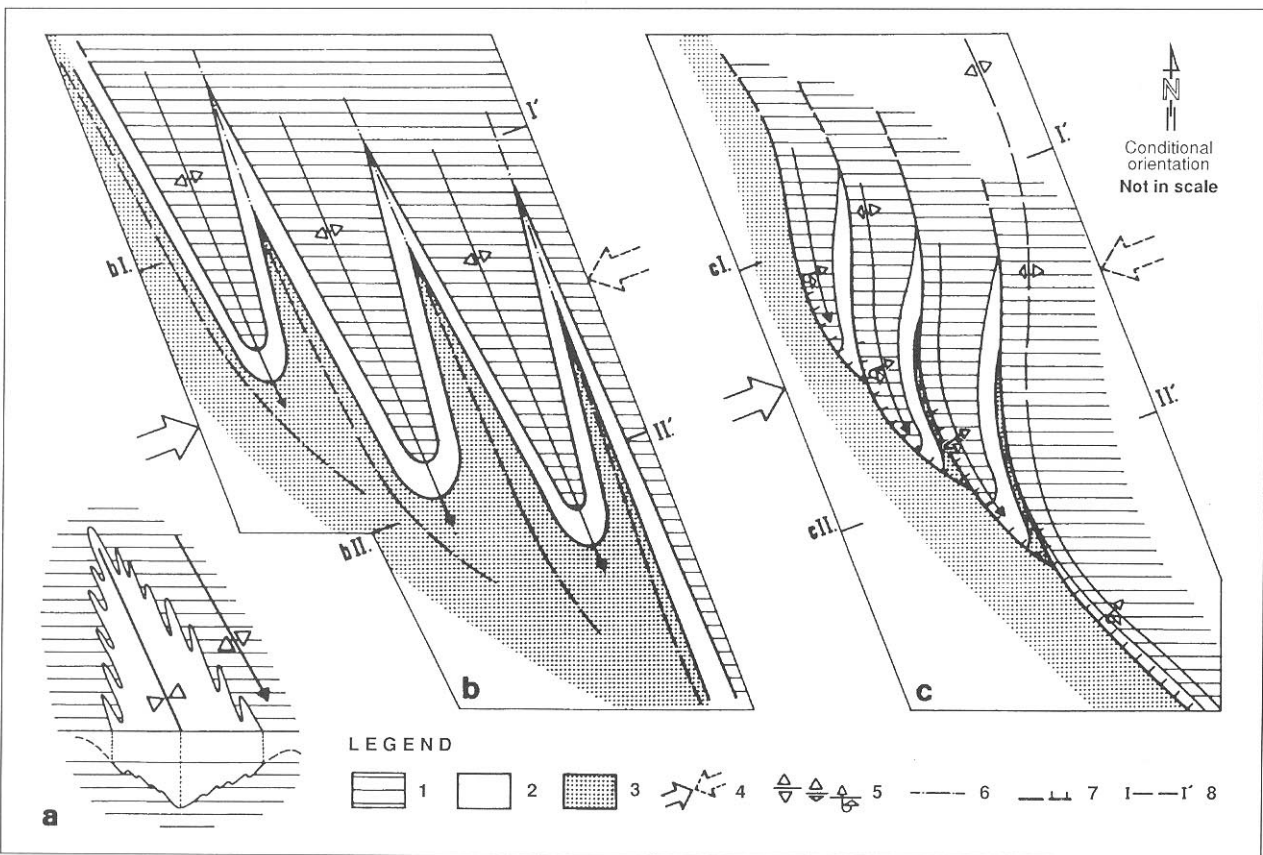


Fig. 4 The genesis of the helicoidal fault system: a) presumed original tectonic fabric of tangential folded structures; b) collisional stress implied on en échelon folds; c) imbricate structure and convergent helicoidal fault splays. Legend: Competent rocks: 1) Upper Cretaceous rudist limestone; 2) Eocene foraminifera limestones. Incompetent rocks: 3) Eocene flysch. 4) Principal stress orientation; 5) upright, inclined and overturned anticline; 6) predetermined fault zones; 7) normal and reverse fault; 8) trace of schematic geological profile.

Sl. 4 Postanak sustava helicoidalnih rasjeda: a) pretpostavljeni polazni tektonski sklop tangencijalnih boranih struktura; b) ešalonirane bore izložene horizontalnom stresu; c) ljuskave strukture i konvergirajući snop helicoidalnih rasjeda. Legenda: Kompetentne stijene: 1) gornjokredni rudistni vapnenci i 2) eocenski foraminiferski vapnenci; nekompetentne stijene: 3) eocenski fliš. 4) Orijentacija glavnog stresa; 5) uspravna, kosa i prebačena antiklinala; 6) predisponirane zone rasjeda; 7) rasjed normalnog, reverznog karaktera; 8) trasa shematskog geološkog profila.

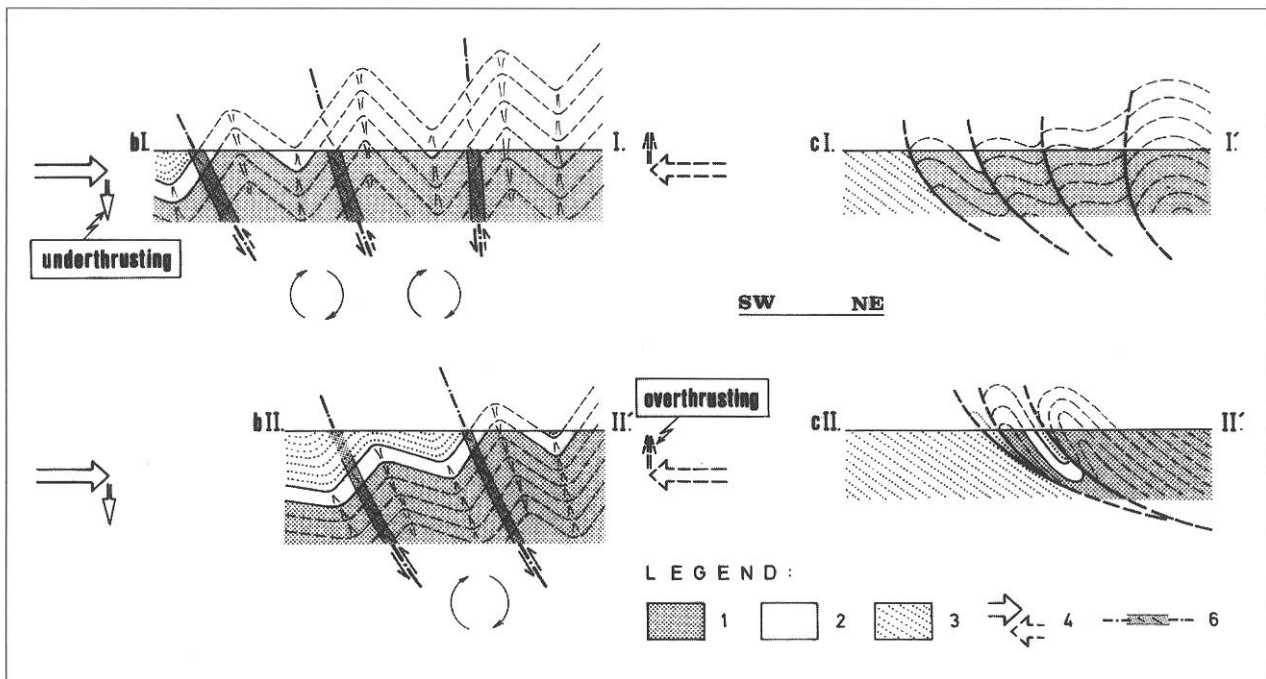


Fig. 5 Presentation of structural changes on schematic geological profiles, an addition to Fig. 4. a) En échelon folds from Fig. 4b. Due to bending of presumed megastructure (Fig. 4a) the axial planes and fold limbs change their strike and dip; b) the result of the first deformation phase: imbricate structures of variable deformation intensity with faults merging into the main fault zone. Symbol explanation as for Fig. 4.

Sl. 5 Praćenje strukturalnih promjena na shematskim geološkim profilima, dopuna sl. 4. a) Borane strukture ešaloniranog rasporeda sa sl. 4b. Oponašajući zakrivljenost pretpostavljene megastrukture (sl. 4a) bore mijenjaju elemente položaja osnih ravnina i krila. b) Rezultat djelovanja generalnog stresa i otpora istome u prvoj fazi strukturalnih promjena: ljuskave strukture različitog intenziteta poremećaja uz stapanje rasjeda u jedinstvenu rasjednu zonu. Značenje simbola vidi u potpisu sl. 4.

(regarding their structural form and predominance of carbonate rocks near the surface) are uplifted while the synclines, as the more mobile parts (regarding their negative form and predominance of clastics) tend to subside. This results in brittle failure within the folds inflection zones and thus in the formation of faults (Fig. 5a).

Within parts of en échelon folds dominated by anticline structures characterized by the more rigid carbonate rocks, the developed faults are partially of normal type and with vertical fault planes. Therefore the reduction of width of the original en échelon structure due to faulting is minimal (Figs. 4c, 5b, profile c I-I'). In contrast, within the parts of en échelon folds dominated by synclinal structures characterized by predominance of the thick, less competent clastics, the developed faults are of a reverse type with fault planes that dip in the direction of the main collisional stress, i.e. with structures showing opposite vergence (Figs. 4b, 5a, profile b II-II').

As the anticlines plunge and turn into a uniform gross synclinal structure the reverse faults merge into a single main fault that could possibly become an overthrust structure (Figs. 4c, 5b, profile c II-II'). The reduction of width of the original en échelon structure is maximal: the synclinal structures, the thickness of the clastic complex, as well as the deeper position of carbonate rocks reduce the resistance to the main collisional stress.

The transition between the described end cases is gradational regarding the character and shape of the developed structures as well as to the intensity of the deformation.

The first phase of the geodynamic process thus results in the formation of a system of convergent helicoidal faults (Fig. 3), and in modified en échelon imbricate structures, that mark the structural fabric in general (Fig. 4c). The strike of the imbricate structures changed in respect to the strike of the axial planes of the original en échelon folds. In the process of the formation of the imbricate structures and the convergent splay of helicoidal faults, respectively, the reduction of the original width resulted in bending of the strike lines. This change in strike is only local due to specific conditions and not due to change in the regional orientation of the main collisional stress direction, as is shown on the presented model.

The next deformation phase of the geodynamic process is marked by a relative change in the stress field orientation (ANDERSON & JACKSON, 1987; RITSEMA, 1974) with a generally N-S to NNW-SSE orientation of the greatest principal stress axis, i.e. diagonally to the dinaric strike of the structures. Although this change in orientation was gradual we shall discuss here and schematically present only the youngest deformational phase.

The previously formed faults in the marginal part of the convergent splay of the helicoidal system, strike

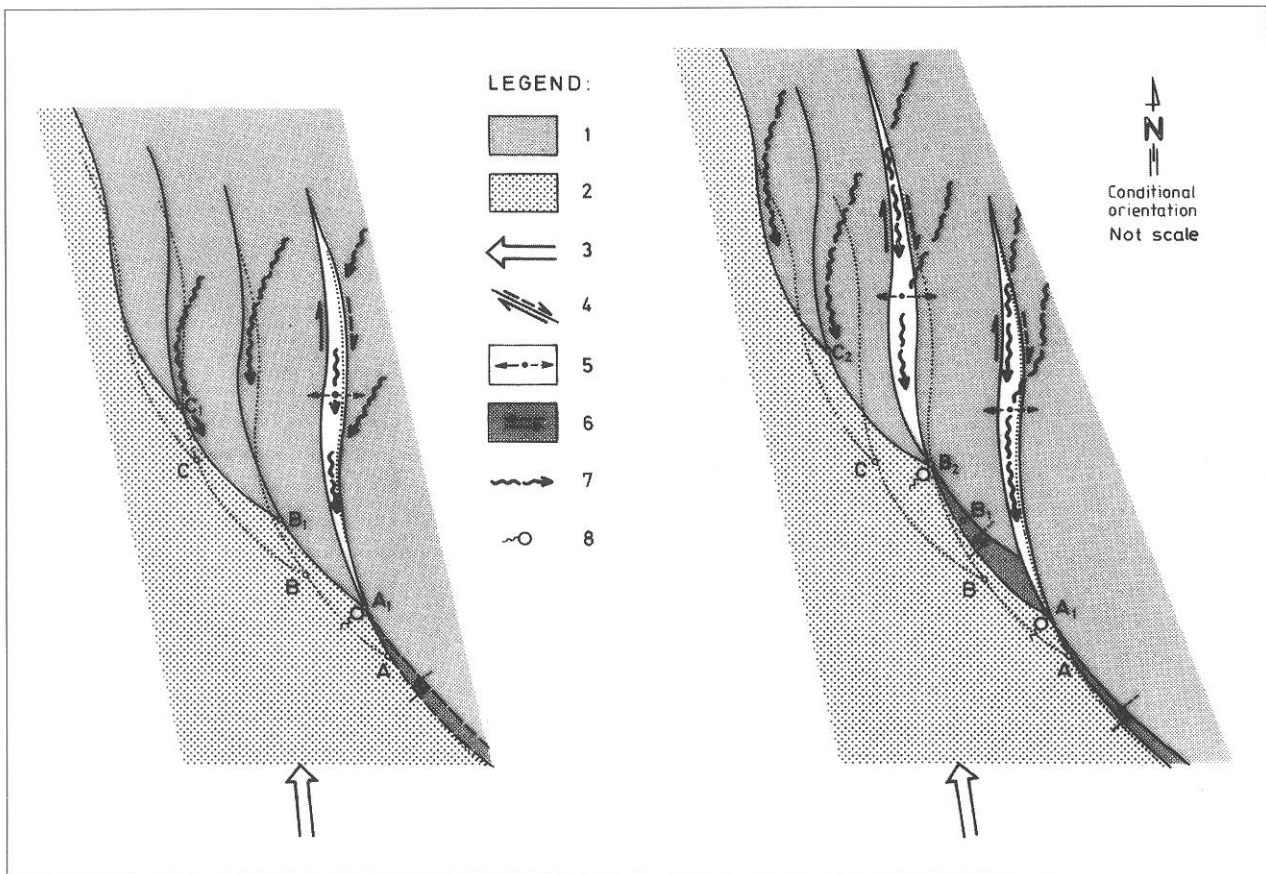


Fig. 6 The structural development in the second phase of the geodynamic process due to the regional change of stress field orientation; the development of the transension zone; the impact of structures to hydrogeology. Legend: 1) karstified carbonate rocks - permeable rocks; 2) flysch sediments - impermeable rocks; 3) stress field orientation; 4) faults with the sense of displacement - predetermined groundwater flow conduits; 5) transension zones, i.e. zones of extension fractures; 6) the transpression zones - relative barrier to groundwater flow; 7) supposed groundwater flow direction; 8) potential spring occurrence.

Sl. 6 Dva slučaja strukturalnih promjena druge faze geodinamskog procesa u uvjetima promjene smjera generalnog stresa; formiranje ekstenzijskih zona; naznaka hidrogeološke uloge formiranih struktura. Legenda: 1) okršene vapnenačke stijene - propusne stijene; 2) flišni sedimenti - nepropusne stijene; 3) orijentacija stresa; 4) rasjedi s oznakom kretanja krila - privilegirani pravci kretanja podzemne vode; 5) zone ekstenzijskih karakteristika - zjapeće pukotine; 6) zone kompresijskog karaktera - relativne barijere kretanja podzemne vode; 7) pretpostavljeni smjer kretanja podzemne vode; 8) mogući izvori.

almost parallel with the greatest principal stress axis (Figs. 3 and 6). Thus, the dextral strike-slip and oblique-slip displacements predominate. The magnitude of displacement is directly related to the mass of competent, rigid blocks bounded by faults of the system as well as to the volume of the clastic flysch complex of the tectonically reduced synclinal structure.

The dextral strike-slip displacements along subparallel fault planes of the convergent splay of the helicoidal system lead to the development of a transension zone (RAMSAY & HUBER, 1987) with extension fractures (Fig. 6). This is particularly well developed within the competent carbonate rocks even in cases when these are overlain by clastic flysch sediments. These fractures can rarely be seen on the surface as they become partially filled and hidden, due to gravitational collapse and rock fall.

The importance of the described interpretation of the helicoidal fault system is manifold. It could be applied to resolving structural problems and genesis of

terrains characterized by tangential tectonics, e.g. in the fold-thrust belts. Moreover, one can clearly realise the possibility for palaeogeographic and palinspastic reconstruction as well as for studying structural changes during the geodynamic process by applying the reverse method of study to the one described above.

The particular importance and influence of helicoidal fault systems on hydrogeology should be also emphasized (Fig. 6). The fault contact between the carbonate and clastic complex is also the contact between permeable and impermeable rock units; the impermeable clastics that are mostly fault bounded flysch wedges, represent hanging barriers that extend relatively deeply underground, thus clearly determining the vertical and horizontal groundwater flow. However, even the faults of the helicoidal system that strike into the carbonate rock complex play an important role in the groundwater flow regime: the predetermined groundwater flow directions could be expected along these fault zones. Furthermore, within the transension

zone with abundant extension fractures developed in the carbonate rocks massive development of cave systems could be expected as well as the occurrence of springs of the greatest discharge.

### 3. CONCLUSION

The helicoidal fault systems of Vinodol represent convergent splay faults that joint into the main reverse fault. They could be particularly important in regions characterized by compressive tangential tectonics, i.e. within the fold-thrust belts. They have their origin in deformation induced by collisional stress imposed on previously formed en échelon folds composed mostly of competent and incompetent rocks. The most recent structural fabric was produced by a relative change in the stress field orientation that resulted in the predominance of strike-slip displacements along the faults of the system.

During the next deformation phase the formation of extension fractures in competent rocks could be expected due to transtension developed at fault bends.

Regarding their particularly marked impact on karst hydrogeology the faults of the helicoidal system whether developed in permeable strata, or along their contact with impermeable rocks, could be predetermined to serve as the main groundwater flow conduits. Within the transtension zones developed at their bends they could result in the occurrence of karst springs of the highest discharge values.

The described model could be applied in regions of similar geology, e.g. throughout the External Dinarides, or further afield.

### 4. REFERENCES

- ANDERSON, H. & JACKSON, J. (1987): Active tectonics of the Adriatic region.- *Geophy. J. R. Astr. Soc.*, 91, 937-983.
- BLAŠKOVIĆ, I. (1991): Raspored uzdužnih, reversnih i normalnih rasjeda i konstrukcija oblika i dubina ploha podvlačenja.- *Geol. vjesnik*, 44, 247-256.
- BLAŠKOVIĆ, I. & ALJINOVIĆ, B. (1981): Mikrotektonski elementi kao osnova za model tektonske grade šireg područja Kvarnera.- *Zbornik radova simpozija "Kompleksna naftogeološka problematika podmorja i priobalnih dijelova Jadranskog mora"*, Split, 1, 87-100, Zagreb.
- GRIMANI, I., ŠUŠNJAR, M., BUKOVAC, J., MILAN, A., NIKLER, L., CRNOLATAC, I., ŠIKIĆ, D. & BLAŠKOVIĆ, I. (1973): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za list Crikvenica L 33-102.- *Inst. geol. istraž. Zagreb* (1963), Savezni geol. zavod Beograd, 47 p.
- HARDING, T.P. (1983): Divergent wrench fault and negative flower structure. Andaman Sea.- In: BALLY, A.W. (ed.): *Seismic expression of structural styles, Volume 3. Am. Assoc. of Petr. Geol. Studies in Geology, ser. 15, 4.2.1.-4.2.8.*
- HERAK, M. (1980): Sustav navlaka između Vrbovskog i Delnica u Gorskom Kotaru (Hrvatska).- *Acta Geologica*, 10/2, 35-51, Zagreb.
- NAYLOR, M.A., MANDL, G. & SIJPESTEIJN, C.H.K. (1986): Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states.- *Jour. Struct. Geol.*, 8, 737-752.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. (1987): The techniques of modern structural geology, Vol. 2.- *Academ. Press, London*, 309-700.
- RITSEMA, A.R. (1974): The earthquake mechanism of the Balkan Region.- *UNDP Projekt R. 3 EM, 70/172, UNESCO, Skopje.*
- SYLVESTER, A.G. (1988): Strike-slip faults.- *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1666-1703.
- ŠUŠNJAR, M., BUKOVAC, J., NIKLER, L., CRNOLATAC, I., MILAN, A., ŠIKIĆ, D., GRIMANI, I., VULIĆ, Ž. & BLAŠKOVIĆ, I. (1970): Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100.000, list Crikvenica L33-101.- *Inst. geol. istraž. Zagreb* (1958-1967), Savez. geol. zavod Beograd.

## Sustavi helikoidalnih rasjeda u Vinodolu i njihov postanak

Ivan BLAŠKOVIĆ

### 1. UVOD

Istraživanjima geoloških i posebno strukturnih odnosa u području Vinodola, točnije sjeveroistočnog oboda doline, utvrđeni su sustavi rasjeda različitih karakteristika, koje se mijenjaju po pružanju i nagibu rasjednih ploha.

Sjeveroistočni obod Vinodola izgrađen je pretežito iz gornjokrednih rudistnih i paleocensko-eocenskih foraminiferskih vapnenaca. Oni su međusobno u transgresivnom, diskordantnom kontaktu. Samu dolinu izgrađuju eocenski flišni sedimenti (GRIMANI et al., 1973). Kontakt između vapnenaca oboda i fliša doline je rasjedan i nije jedinstven; sastoji se iz 2 ili više rasjeda koji se u pružanju i funkciji stapaju u reverzne odnosno navlačne strukture. Uz kose, prebačene i izoklinalne bore, točnije sinklinalne dijelove tih bora, jugozapadne vergencije, upravo navedenim rasjedima može se objasniti mjestimice duboko uvlačenje flišnih sedimenata (sl. 1).

U takovim strukturnim odnosima bore su fragmentarno sačuvane; sinklinalni dijelovi izgrađeni iz flišnih naslaga su rasjedima reducirani, odnosno nalaze se u podinskim krilima reverznih rasjeda, dok veću površinu imaju antiklinalni dijelovi bora, izgrađeni iz rigidnijih vapnenačkih stijena. Oni su u krovinskim krilima istih rasjeda.

Rasjedi su vrlo uočljivi u dijelu protezanja gdje tvore kontakt između karbonatnih stijena oboda i flišnih naslaga; pružajući se u nastavku i unutar vapnenačkih stijena oboda Vinodola vrlo se teško zapažaju, osim prekidom i translacijom transgresivne granice između rudistnih i foraminiferskih vapnenaca ili indirektnim geomorfološkim pokazateljima, najčešće nizom ponikvi u pravocrtnom rasporedu.

### 2. SUSTAVI HELIKOIDALNIH RASJEDA U VINODOLU

Opisani sustavi se mogu generalno definirati kao konvergentni snop rasjeda koji se spajaju u rasjed s jedinstvenom rasjednom plohom (sl. 2). U perifernom dijelu snopa, međusobno više ili manje udaljeni, uglavnom su pružanja NNW-SSE, horizontalnog odnosno dijagonalnog, pa i moguće normalnog kretanja krila.

Posebnost rasjeda koji čine sustav je helikoidalni oblik rasjednih ploha (HARDING, 1983; NAYLOR et al., 1986; SYLVESTER, 1988) po pružanju; uz postupnu promjenu veličine nagiba mijenja se i smjer nagiba. Modelski obrađujući jedan od sustava to je i prezentirano na sl. 3.

Približavajući se mjestu spajanja, rasjedne plohe se ustrmljuju sve do okomitog položaja, a idući dalje po pružanju zauzimaju suprotan smjer nagiba od polaznog; karakter rasjedanja postaje reverzan uz dijagonalno i dominantno vertikalno kretanje krila. Mijenja se pružanje rasjeda u sve izraženiji dinaridski pravac (NW-SE).

Spojeni snop rasjeda u rasjed s jedinstvenom rasjednom plohom relativno blažeg ili blagog nagiba (najviše

do 25°), označen je izrazitim reverznim karakterom i s mogućim prijelazom u strukturu navlake. Vergencija reverznih ili navlačnih struktura identična je vergenciji bora tj. prema jugozapadu.

Postanak takovih rasjednih sustava je rezultat složenog tektonizma i geomehaničkih karakteristika karbonatnih i klastičnih sedimentnih kompleksa koji izgrađuju te strukture. Može se objasniti određenim sljedom geodinamskih procesa, kako je to modelom i učinjeno u nastavku.

Geodinamski razvoj započinje laramijskim pokretima. Pod utjecajem horizontalnog stresa i otpora istom, formiraju se bore ešaloniranog rasporeda (sl. 4) i konsekvantne morfologije.

U nastavku procesa, u predpirenejskoj i pirenejskoj fazi geodinamskih promjena, pretpostavljaju se antiklinorijski dijelovi struktura s dominacijom karbonatnih stijena te sinklinorijski dijelovi u kojima su istaložene flišne klastične stijene većih debljina. I ovdje se debljina klastita veže uz sinformu, kao dio megastrukture veće mobilnosti tijekom sedimentacije, u smislu subsidencije.

No i u geodinamskom procesu daljeg, intenzivnijeg boranja koje sljedi, mobilnost sredine, a posebno debljina fliša je od presudne važnosti; amplitude bora su u izravnoj ovisnosti i o debljini plastičnih sedimenata.

U nastavku djelovanja horizontalnog stresa, a koji u regionalnim okvirima dovodi do podvlačenja - subdukcije kontinentalne kore Adrijatika pod Dinarik (HERAK, 1980; BLAŠKOVIĆ & ALJINOVIĆ, 1981; BLAŠKOVIĆ, 1991) strukturne promjene su odraz dijelom i rotacije svake od bora oko **b** - osi (sl. 5a); antiklinalne kao rigidniji, kompetentniji dijelovi, s obzirom na strukturni oblik i dominaciju vapnenačkih stijena, bliže površini se izdižu, a sinklinalne kao mobilniji dijelovi bora, s obzirom na negativnu formu te dominaciju klastita, teže spuštaju. To rezultira pucanjem u zoni pregiba bora tj. infleksije i rasjedanjem (sl. 5a).

U dijelovima ešaloniranih bora, u kojima dominiraju antiklinalne strukture, s istaknutijom površinom i kinematskom ulogom rigidne kompetentne vapnenačke stijene, rasjedi su dijelom i normalnog karaktera i s vertikalnim rasjednim ploham. Redukcija širine primarnog ešaloniranog strukturnog sklopa uslijed rasjedanja je minimalna; horizontalnom stresu suprotstavljen je odgovarajući otpor, kao rezultat antiformalnih struktura i rigidnijih kompleksa stijena (sl. 4c I, 5b, profil c I-I').

Nasuprot tome, u dijelovima ešaloniranih bora u kojima dominiraju sinklinalne strukture s većom površinom i debljinom flišnih naslaga, podatnijih deformacijama, rasjedi će biti reverznog karaktera, s rasjednim ploham nagnutim u smjeru glavne osi stresa, odnosno sa strukturama suprotne vergencije (sl. 4b I, 5a, profil b II-II').

Budući da čela antiklinala tonu i prelaze u jedinstvenu sinklinalnu strukturu, dolazi do stapanja reverznih rasjeda u jedinstveni rasjed s mogućnošću njegovog prijelaza u strukturu navlake (sl. 4c I; sl. 5b, profil c II-II'). Redukcija širine primarnog ešaloniranog sklopa je maksimalna;

sinklinalne strukture i debljina klastičnog kompleksa stijena, te dublja pozicija vapnenačkih stijena u podini, smanjuju otpor glavnom kolizijskom stresu.

Prijelaz između opisana dva krajnja slučaja je postupan s obzirom na karakter i oblik struktura, kao i intenzitet poremećaja.

Rezultat opisane prve faze geodinamskih procesa predstavlja formiranje konvergirajućeg snopa - sustava helikoidalnih rasjeda (sl. 3), odnosno u općem strukturnom sklopu modificiranih, također ešaloniranih ljuskavih struktura (sl. 4c). Pružanje ljuskavih struktura promijenjeno je u odnosu na pružanje osnih ploha ishodišnih ešaloniranih bora; u procesu formiranja ljuskavih struktura, odnosno konvergentnog snopa helikoidalnih rasjeda došlo je do povijanja pružanja kao rezultat redukcije širine. Takova promjena pružanja je, kako se iz prezentiranog modela vidi, tek lokalna pojava vezana uz specifične uvjete, a ne posljedica promjene smjera glavne osi stresa.

Iduća faza geodinamskih procesa označena je relativnom promjenom smjera stresa (ANDERSON & JACKSON, 1987; RITSEMA, 1974); stres je usmjeren prema sjeveru odnosno sjeverosjeverozapadu, dijagonalno na dinaridsko pružanje struktura. Do te promjene dolazi postupno, međutim, ovdje se shematskim prikazom komentira najmlađa faza.

Tako orijentirani stres gotovo je paralelan pružanju rasjeda na perifernom dijelu konvergentnog snopa koji tvore helikoidalni sustav (sl. 3 i 6). Pod njegovim utjecajem odvija se dijagonalno pa i horizontalno kretanje krila rasjeda; uglavnom je to desno kretanje. Veličina hoda je ovisna o masi kompetentnih, rigidnijih fragmenata između rasjeda sustava i istovremeno o površini i debljini klastičnog flišnog kompleksa tektonski reducirane sinklinalne strukture.

U svakom slučaju, u zoni spajanja snopa helikoidalnih rasjeda sustava, gdje se tim rasjedima zatvaraju rigidniji fragmenti, i gdje je očita promjena pružanja vanjskih rasjeda sustava, kao i sve to veći nagib jedinstvene rasjedne plohe, uslijed desnog kretanja krila dolazi do formiranja ekstenzijske zone (RAMSAY & HUBER, 1987), čijim progresivnim razvojem nastaje sustav zjapećih pukotina (sl. 6), međusobno uglavnom povezanih. To je posebno izraženo u kompaktnim vapnenačkim stijenama koje su i u podini klastičnih flišnih naslaga, ukoliko su ove prisutne u strukturi i na površini.

Takve će pukotine na površini biti rijetko vidljive; uslijed gravitacijskog povijanja ili obrušavanja dijelom su zatvorene i skrivene.

Značenje opisanih helikoidalnih rasjednih sustava je višestruko. Može se primijeniti u rješavanju strukturnog sklopa i njegove geneze u područjima karakteriziranim tangencijalnim boranim i rasjednim strukturama istoznačne vergencije.

Nadalje, ukoliko se primjeni obrnuti postupak od tretiranog u ovom radu, jasno je istaknuta mogućnost paleogeografske i palinspastičke rekonstrukcije primarnih odnosa, kao i praćenje promjena tijekom geodinamskog procesa.

Valja posebno istaknuti i značenje helikoidalnih rasjednih sustava u hidrogeologiji. Na slici 6 dijelom su naznačene i hidrogeološke uloge stijena i strukturnih elemenata. Slijedi i kratki komentar takovog prikaza.

Rasjedni kontakt vapnenačkog i klastičnog kompleksa je i kontakt propusnih i nepropusnih naslaga; klastične naslage u ovakovim odnosima predstavljaju viseću barijeru relativno dubokog dosega. Obično su to tektonski uključeni flišni sedimenti uz rasjede sustava. S takovom ulogom jasno dijelom određuju i kretanje podzemne vode u horizontalnom i vertikalnom smislu. No, i sami helikoidalni rasjedi sustava, unutar okruženog vapnenačkog kompleksa, igraju značajnu hidrogeološku ulogu; duž rasjeda - rasjednih zona mogu se pretpostaviti privilegirani smjerovi toka podzemne vode; okomito na njih pretpostavlja se znatno smanjena mogućnost protjecanja. U zonama formiranih zjapećih pukotina unutar rasjednog sustava, duž kojih je logično očekivati i speleološke objekte, s velikom vjerojatnošću mogu se formirati izvori i značajnijeg kapaciteta.

### 3. ZAKLJUČAK

Rezultati rada mogu se svesti u nekoliko zaključaka.

Sustavi helikoidalnih rasjeda predstavljaju konvergentni snop rasjeda koji se spajaju u jedinstveni rasjed reverznog karaktera. Značajni su za terene označene kompresijskim tangencijalnim strukturama. Nastaju kao rezultat deformacija ešaloniranog rasporeda bora, u pravilu izgrađenih iz kompetentnih i nekompetentnih stijena, izloženog horizontalnom stresu. Recentni strukturni sklop nastaje relativnom promjenom smjera horizontalnog stresa, što dovodi do horizontalnog kretanja uz pojedine rasjede sustava.

U toj drugoj fazi geodinamskog procesa moguće je formiranje ekstenzijskih - zjapećih pukotina u kompaktnim stijenama u rasjednim zonama.

S obzirom na posebno izraženu hidrogeološku ulogu u krškim terenima, rasjedi helikoidalnog sustava, unutar propusnih stijena i u dodiru s nepropusnima, mogu biti privilegirani pravci tokova podzemne vode, odnosno zone izdašnih izvora, posebno na mjestima ekstenzijske dezintegracije stijena.

Primjena opisanog modela bila bi poželjna u terenima sa sličnim geološkim odnosima, a to znači u širokom pojasu Vanjskih Dinarida, iako ni kronostratigrafski ni prostorno nije ograničena i na druge areale.

Manuscript received September 9, 1996.

Revised manuscript accepted April 28, 1997.